Mécanique des fluides et techniques associées

I- Description d'un fluide

1- Fluide visqueux et non visqueux

- **Déf :** un fluide est un ensemble de particules entre lesquelles s'exercent des forces d'attraction (force de Van der Waals , liaison hydrogène …) mais qui sont insuffisantes pour donner une forme propre à ces systèmes contrairement aux solides. Ce sont soit des gaz , soit des liquides.

- **Prop** : en conséquence , au sein de ce système les particules peuvent se mouvoir les unes par rapport aux autres . Elles s'entrechoquent en permanence , de même qu'avec les objets plongés dans ce fluide.

  Ces chocs peuvent être élastiques (conservation de l'énergie cinétique) ou inélastique (dissipation d'énergie) . Dans un cas on aura un fluide non visqueux (dit « parfait »). Ce n'est jamais le cas en pratique mais cela peut être une approximation correcte dans un certain nombre de cas (ex de l'eau par exemple).

  Les autres fluides (ex : huile …) seront dit visqueux. Leur viscosité sera plus ou moins grande , c'est à dire qu'ils auront plus ou moins tendance à résister au mouvement que l'on cherche à leur imposer et dissiperont d'autant plus d'énergie. On définira un coefficient de viscosité (noté η) pour les caractériser

2- particule fluide

En mécanique , on étudie d'habitude des systèmes solides non déformables. Ici le problème est plus complexe car un fluide n'a pas de forme propre (elle change !).

Le système d'étude est en fait un tout petit morceau de ce fluide (appelé particule fluide), suffisamment grand toutefois pour contenir un très grand nombre de molécules (disons 10^{20}) de sorte à ce qu'on puisse définir une pression et une température (qui sont des grandeurs moyennes sur un ensemble de particules) pour ces particules fluides.

Ce qui nous intéresse notamment est l'étude de l'écoulement des fluides . On étudiera donc comment se déplace et se déforme une « particule fluide ».

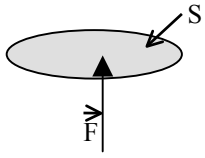
3- ligne de courant

Lorsque on a un écoulement assez calme (laminaire : voir définition dans la suite du cours), on peut définir des « lignes de courant » qui sont les trajectoires des particules fluides étudiées dans l'écoulement . En gros , imaginez que vous mettez une goutte de permanganate de potassium dans une canalisation transparente , la trace laissée par le colorant est une ligne de courant (en régime stationnaire , c'est à dire établit.).

Les lois sur les écoulements , genre Bernouilli , etc … ne seront valables que sur une même ligne de courant , éventuellement sur un tube de courant qui est un ensemble de lignes de courant assez proches .

II- Mesure de pression dans un liquide : statique des fluides

1- Définition



Considérons un objet plongé dans un liquide par exemple . En permanence et de façon aléatoire les particules du liquide viennent heurter l'objet (c'est un choc $\tau << 1$ s). la fréquence de ces chocs et leur intensité détermine la pression exercée sur l'objet .

Si l'on considère une surface S de l'objet en question et que le liquide exerce (du fait des chocs de particules incessants) sur cette surface S une force de valeur F (perpendiculaire à la surface)alors la ***pression P est définit comme la force par unité de surface :***

$$p = \frac{F}{S}$$ F en N ; S en m^2 ; p en $N.m^{-2}$ ou Pa (Pascal)

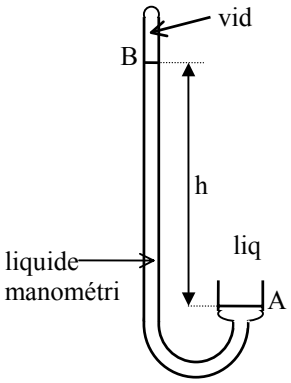
Il est a noté que quelle que soit l'orientation de la surface de l'objet , la pression au sein de liquide reste la même pour une profondeur donnée !

Unité : le Pascal (Pa) 1 Pa = $1N/m^2$

Rq : 1 bar = 10^5 Pa

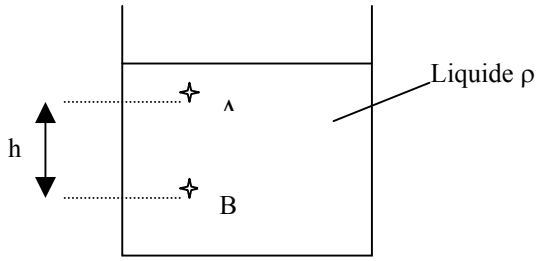
2- Mesure

Elle s'effectue grâce à un ***manomètre*** qui comprend une petite membrane déformable et étanche en contact avec le liquide dont on veut déterminer la pression . Le liquide exerce une pression sur cette membrane , pression transmise au liquide (mercure souvent) situé à l'intérieur du manomètre et qui montera d'autant plus que la pression au niveau de la membrane est importante . Avec une graduation adéquate (voir 3), on peut lire la valeur de la pression (en Pa)



3- loi de la statique

La pression varie avec la profondeur au sein d'un fluide . En effet l'intensité des chocs sur l'objet de la part des particules dépend aussi de l'environnement de ces dites particules et elles subissent donc l'influence indirecte de l'ensemble des particules situées au dessus d'elles . Cette influence indirecte est liée à l'existence de la pesanteur terrestre exerçant automatiquement sur chaque particule une force dirigée vers le bas .



Un résultat essentiel = loi de la statique des fluides

La différence de pression entre 2 point d'un liquide au repos est :

$$\Delta P = h.\rho.g$$

où h est la différence d'altitude entre les deux points, ρ est la masse volumique du liquide.

Conséquence :

Dans un liquide au repos, la pression reste constante dans un même plan horizontal.

Par voie de conséquence , un liquide à la pression atmosphérique présente une surface horizontale

Remarque : dans de la verrerie suffisamment étroite , ce n'est pas ce que l'on observe . Ceci est du à d'autres forces que la pesanteur (seule responsable de cette loi de la statique des fluides) appelées forces de tension superficielle (ou de capillarité). Quand le diamètre de la verrerie diminue , leur importance relative augmente (en surface seulement !) et modifie les surfaces des liquides.

- **Exercice 1** : en se place dans le cadre du dessin du II-2 : que vaut la pression en A en fonction de h , ρ (masse volumique du liquide manométrique) et P_B ?
- **Exercice 2** : un plongeur se trouve à 20 m de profondeur .
  a- Quelle est la pression de l'eau à ce niveau ?
  b- Quelle est la force exercée sur un tympan de surface 1,5 cm^2 ?

III- bilans des forces dans un liquide

1- poussée d'archimède

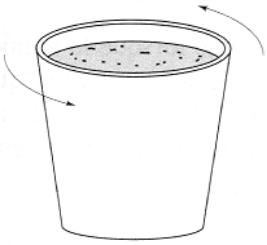
Si l'on flotte sur l'eau par exemple , c'est bien que nous ne sommes pas soumis qu'à la seule force d'attraction terrestre , dirigée vers le bas. L'énoncé d'Archimède (savant grec) dit les choses ainsi : *« tout corps plongé dans un liquide est soumis à une force dirigée vers le haut »*. Quelle est l'origine de cette force ?

Si on plonge une sphère dans de l'eau, la pression de l'eau au bas de la sphère est plus grande que la pression en haut de la sphère d'après la loi de la statique des fluides .. En effet, le bas de la sphère est plus profond, donc là ou la pression est plus grande. Donc l'eau exerce une force moindre (pour une même surface d'objet) au dessus de la sphère qu'en dessous.

Au final, la sphère ressent donc une force dirigée vers le haut, exercée par l'eau. Cette force provient de la différence de pression entre le haut et le bas de la sphère. On l'appelle **poussée d'Archimède**

2- force de viscosité

2-1- expérience



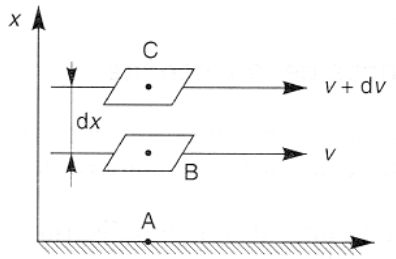
Une expérience, que chacun peut faire, permet de mieux cerner le phénomène de viscosité. Prenons un verre d'eau. Déposons en surface (fig. 29) des objets légers (liège râpé, graines). Si l'on fait tourner le verre sur lui-même (autour de son axe), les objets restent sensiblement immobiles (par rapport à la table ou à l'observateur) : l'eau n'est pas entraînée par le verre, elle est peu visqueuse. Recommençons la même expérience avec de l'huile : les petits objets sont entraînés par le mouvement du verre ; l'huile est visqueuse.

2-2- force de viscosité

- **Définition.**

L'expérience qui précède suggère le modèle suivant, qui est basé sur l'idée de **frottement à l'intérieur des fluides.** Imaginons un fluide en mouvement par rapport **à** une paroi (fig ci dessous).

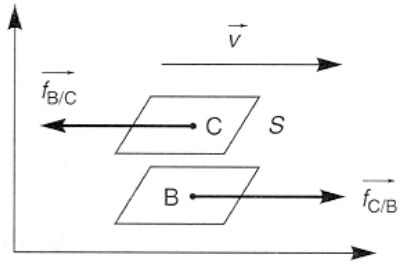
- En A la vitesse est pratiquement nulle : il y a une petite couche «collée » à la paroi.
- En B la vitesse est v.
- En C, distant de dx (donc très proche), la vitesse est v + dv. Cette différence de vitesse dv s'explique bien : les molécules du fluide étant, en C, moins soumises à l'influence ralentisseuse de la paroi qu'en B, peuvent aller plus vite.



Origine de la viscosité

Mais ***cette différence de vitesse crée un cisaillement*** : la couche de molécules de cote x + dx tend à entraîner les molécules de cote x (qui sont plus lentes) et inversement ces dernières tendent à freiner celles, plus rapides, qui sont au niveau de C.

Cette interaction met en jeu des forces dites de cisaillement .La force $f_{C/B}$ (fig. ci dessous) est celle d'entraînement de la couche lente (B) par la couche rapide (C). Inversement pour $f_{B/C}$. Ces forces ont même intensité si on les rapporte à une même surface S : ce sont des actions mutuelles à l'intérieur d'un même système.



forces de Cisaillement au sein du fluide

2-3- coefficients de viscosité

- ***Par définition la viscosité η (éta) est définie par la relation :***

$$f_{C/B} = f_{B/C} = \eta . S \frac{dv}{dx}$$

La grandeur S est la surface tangentielle au mouvement sur laquelle s'exerce f

- **Unité :**

L'unité légale est le pascal-seconde (Pa.s) (à retrouver !).cette unité est souvent dénommée **poiseuille (symbole Pl)**.
Retenons que *1 Pl = 1 Pa.s.*

Vous trouverez également une autre unité, la poise (Po) : *l Pa . s = 10 Po*

- On définit aussi la viscosité cinématique $\nu = \eta/\rho$

- **Unité :** $[\nu] = m^2 / s$ ou le stokes
  $1\ m^2 / s = 10^4$ stokes

2-4- paramètres influençants

La viscosité d'un liquide dépend essentiellement ***des caractéristiques (géométrique et électronique) des molécules et de la température de ce liquide.***

- Globalement les grosses molécules et celles qui peuvent établir des liaisons hydrogène entre elles provoquent une viscosité plus forte

- De façon générale , pour les liquides, une augmentation de température tend à réduire la viscosité.
  Souvent on propose la loi suivante pour modéliser la variation de la viscosité avec la température :

$$\eta = \rho .\exp (B/T^n)$$

T est en Kelvin,
ρ est la masse volumique de l'huile.
B et n sont des caractéristiques de l'huile.

remarque : Pour les huiles de moteurs , on effectue des mélanges complexes de molécules pour que la viscosité de ces huiles restent à peu près constante quel que soit la température .

- Quelques exemples :

LIQUIDES

Ethoxyéthane (éther)	$0{,}22.10^{-3}$	Mercure	$1{,}57.10^{-3}$
Benzène	$0{,}65.10^{-3}$	Acide sulfurique concentré	27.10^{-3}
Eau	$1{,}00.10^{-3}$	Huile d'olive	100.10^{-3}
Ethanol	$1{,}20.10^{-3}$	Glycérol	$1\,000.10^{-3}$

GAZ

Dihydrogène	$0{,}86.10^{-5}$
Dioxyde de carbone	$1{,}39.10^{-5}$
Dioxygène	$1{,}95.10^{-5}$

Viscosité de différents composés à 20 ^{0}C en Pa .s.

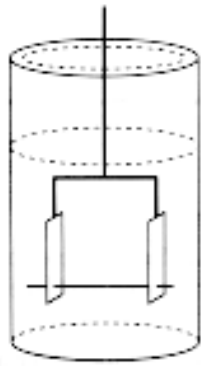
Remarque : la viscosité des gaz est beaucoup plus faible et beaucoup moins variable que celle des liquides.

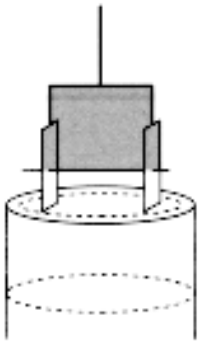
3- force de tension superficielle

3-1- définition

Faisons l'expérience suivante (fig. ci dessous). Fabriquons une «eau de savon » en mettant quelques millilitres de détersif (produit à vaisselle) dans un litre d'eau. Immergeons complètement dans ce liquide le dispositif suivant, à savoir un cadre en fil de fer, formant des coulisses pour une tige droite lestée d'une petite masse. Lorsque nous sortons le système de l'eau, une lame d'eau de savon l'accompagne, jusqu'au moment où la tige sort, elle-même de l'eau. A cet instant, le dispositif étant complètement émergé, la tige remonte vivement de quelques centimètres, comme si la lame d'eau de savon se rétractait à la façon d'une lame de caoutchouc. Nous notons que la tige s'arrête de remonter dans les coulisses, vraisemblablement lorsque son poids est contrebalancé par cette force nouvelle à laquelle il a déjà été fait allusion.

Expérience fondamentale : mise en évidence des forces de tension superficielles



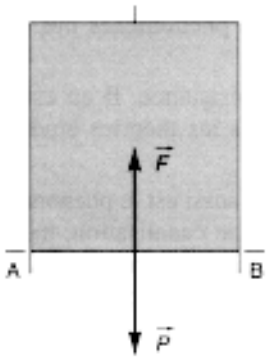


- **Analyse du phénomène**

L'expérience permet de dégager une idée : une **interface** entre un liquide et autre chose (en particulier l'air) a des propriétés proches de celles d'une membrane de caoutchouc tendue. Comme celle-ci la lame liquide abandonnée à elle-même tend à réduire sa surface jusqu'à un minimum qui dépend des contraintes locales. L'analogie s'arrête là d'ailleurs, car les lois quantitatives de la capillarité s'écartent de celles de l'élasticité.

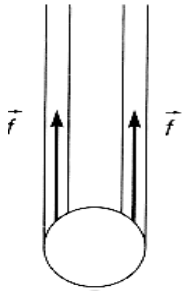
- **La tension superficielle**

La figure 1 nous schématise le montage. Lorsque la tige AB est en équilibre, s'exercent sur elle deux forces ou systèmes de force : ***le poids total P*** et la ***résultante F des forces de tension superficielle***.



La mesure de $\vec{P}$ (en prenant des précautions) permet de déterminer $\vec{F}$ car $\vec{F}+\vec{P} = \vec{0}$ à l'équilibre (accélération nulle dans le PFD)

Mais, si nous voulons maintenant en venir à une analyse plus fine, nous devons noter qu'en fait nous n'avons pas ici une interface, mais deux (2ème figure), et que $\vec{F}$ est en réalité la résultante de deux forces de surface $\vec{f}$, égales par raison de symétrie ($\vec{F} = 2\vec{f}$).
Ceci posé, quels renseignements l'expérience fournit-elle ? Essentiellement ceci :



- La force $\vec{f}$ (que nous considérons désormais, car elle est plus fondamentale que $\vec{F}$, qui est relative à un cas particulier) est proportionnelle à la longueur AB.
- Toutes choses identiques par ailleurs (forme, nature du cadre, etc.) la force $\vec{f}$ dépend de la nature du liquide. Finalement, et par définition :

Le tableau 1 reprend les valeurs de cette grandeur pour quelques liquides, au contact de l'air, et à 20 ^{0}C. La tension superficielle σ dépend de la température : ainsi pour l'eau, elle vaut 62.10^{-3} N/m à 80 ^{0}C.

liquide pur	σ (en N/m)
eau	73.10^{-3}
huile végétale	32.10^{-3}
benzène	29.10^{-3}
éther	17.10^{-3}
éthanol	22.10^{-3}
mercure	480.10^{-3}

σ est très sensible à la présence d'impuretés

Tableau 1 Tension superficielle de différents liquides à 20 C.

3-2- conséquences

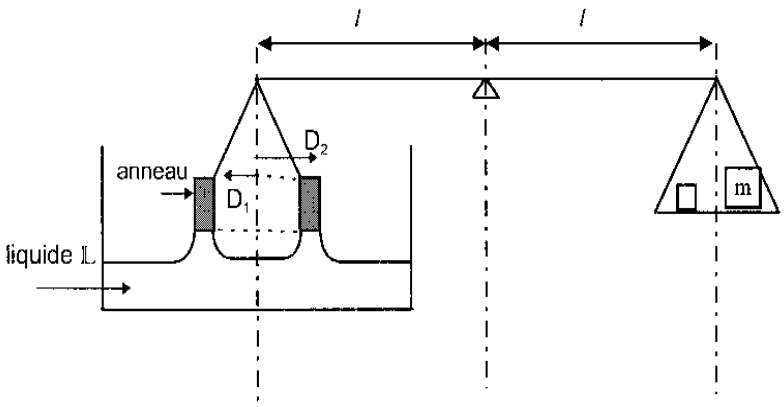
Ces forces sont responsables d'un certains nombres de phénomènes surprenants , parfois gênants , parfois utiles :

- formation des ménisques dans la verrerie fine
- ascension d'un liquide dans un tube très fin (tube capillaire) : loi de jurin (voir annale)
- formation des bulles de savon

3-3- mesure de la tension superficielle : annales 99

Question 1 :Pour mesurer le ccefficient de tension superficielle σ d'un liquide L parfaitement mouillant, on utilise un anneau circulaire, de section mince rectangulaire, dont les diamètres intérieur et extérieur sont respectivement: D1 = 2,20 cm et D2 = 2,40 cm.

Cet anneau est suspendu à l'extrémité du fléau d'une balance (voir schéma ci-contre).



Le poids de la surcharge de masse m= 426 mg placée dans le plateau de droite est égal à la force F due à la tension superficielle, juste à l'arrachement.

a) Montrer que l'expression de la force F en fonction de D1, D2 et σ s'écrit F = σ.π (D1 + D2).
b) Calculer la valeur de σ. On donne: g = 9,81 $m.s^{-2}$

Question 2 : Pour vérifier le résultat précédent, on mesure la hauteur h d'ascension capillaire du liquide L dans un tube vertical de diamètre intérieur d = 1 mm. On obtient: h = 13,4 mm.

Sachant que la masse volumique du liquide est ρ = 884 kg.m-3 , déterminer la valeur du coefficient de tension superficielle σ obtenue par cette méthode.

On rappelle que la hauteur d'ascension capillaire est donnée par la loi de Jurin :
h = (2. σ) / (ρ.g.r) où r est le rayon du tube capillaire.

Question 3 : Une autre vérification est possible: elle consiste à utiliser un compte-gouttes qui laisse s'écouler un volume V donné de liquide et à compter le nombre de gouttes correspondant avec un liquide étalon Lo, puis avec le liquide L à étudier.
La loi de Tate donne la relation entre la masse **m d'une goutte** et le coefficient de tension superficielle σ d'un liquide :

m = k.2.π.R. σ où R est le rayon du compte-gouttes et k une constante.

- Avec de l'eau utilisée comme liquide étalon, on compte no = 25 gouttes dans un volume V.
- Avec le liquide étudié, on compte n = 56 gouttes **pour le même volume** V.

En exprimant m en fonction de ρ, n et V et m_o en fonction de ρ_o, n_0 et V, calculer le coefficient de tension superficielle σ du liquide étudié.

Données : pour l'eau, à la température considérée :
σ_o = 73 x 10-3 N.m-1 ρo = 1000 kg.m-3

IV- écoulement d'un liquide

1- nombre de reynolds

Il existe principalement 2 types d'écoulement l'un dit laminaire , l'autre turbulent . Pour distinguer les 2 , on caractérise un écoulement par un nombre (sans unité ,donc !) dont la valeur détermine le type d'écoulement. On appelle ce nombre « nombre de Reynolds » et on le note Re.

De façon simplifiée :

- si **Re < 100 , on a un régime laminaire** où les ligne de courants sont bien définis. En gros un liquide dans une canalisation s'écoule pour le régime laminaire en couches concentriques glissant les unes sur les autres.

- Si **Re > 100 , on a un régime turbulent** et les lignes de courant ne sont plus alors parfaitement définis et il est alors plus complexe d'étudier les écoulements

En fait **Re = ρ.l.v / η** où ρ = masse volumique du fluide , l = longueur de l'écoulement , v = vitesse de l'écoulement et η = viscosité du liquide.

Remarque :On peut voir que tout chose égale par ailleurs , on aura des écoulements pour de faibles vitesses ou des liquides de fortes viscosité.

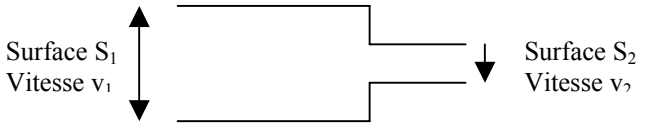
2- caractérisation d'un écoulement

Considérons un réservoir avec au bas de celui ci un petit tuyau horizontal permettant au liquide de s'écouler . Ce qui nous intéresse en pratique , c'est de connaître la quantité d'eau sortant par unité de temps : c'est ce que l'on appelle le **débit volumique** :

- **$D = \Delta V / \Delta t$** = volume traversant une section du tuyau par unité de temps.
- En régime laminaire on a **D = S.v** où v est la vitesse d'une particule fluide à l'endroit où l'on mesure D

Prop : si le régime d'écoulement est établit (on met à l'écart l'instant où l'on ouvre le robinet) et si le liquide est incompressible (ou peu ! c'est souvent le cas) alors on peut affirmer que **le débit se conserve** à différents endroits du tuyau horizontal : D = c^{ste}.

Application : soit le tuyau suivant



On sait que $S_1 = 0{,}2\ m^2$ et $S_2 = 0{,}05\ m^2$
La vitesse des particules dans la grande section $v_1 = 0{,}1$ m/s
Que vaut v_2 vitesse des particules dans la petite section ?

3- écoulement d'un liquide non visqueux

3-1- théorème de Bernouilli

- La relation précédente nous permet de lier la vitesse de l'écoulement à la section du tuyau.
- Cependant , un autre fait important est que la pression au sein du fluide dépend de la profondeur évidemment ,comme on l'a vu pour les fluides au repos mais aussi de la vitesse d'écoulement. Si le fluide n'est pas visqueux , c'est à dire si il n'y a pas dissipation d'énergie, l'énergie totale du fluide se conserve et l'on a la relation suivante qui est applicable :

  - **Théorème de Bernouilli :**

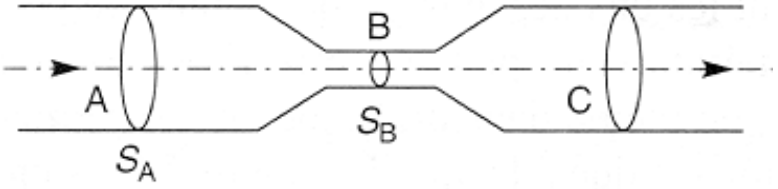
  On considère 2 points : « 1 » et « 2 » sur une même ligne de courant.
  Z_1 est l'altitude (p/r à une référence arbitraire) du point « 1 » , P_1 la pression en ce point et v_1 la vitesse de l'écoulement en ce point.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 = c^{ste}$$ en tout point d'une ligne de courant.

3-2- conséquences

A. Effet venturi

Phénomène de Venturi. Soit un tube «convergent-divergent» (fig. ci dessous) c'est-à-dire un tube dont la section va tout d'abord en diminuant, puis en reprenant sa section initiale. Si l'on mesure la pression dans un tel tube parcouru par un liquide, on constate que la pression en B est inférieure à celle de A et C. Ceci s'explique bien grâce au théorème de Bernoulli.



Phénomène de Venturi

pour simplifier, nous supposons A, B et C dans le même plan horizontal, nous pouvons écrire :

- **Question** : trouver P_B en fonction de P_A

C'est l'effet Venturi :

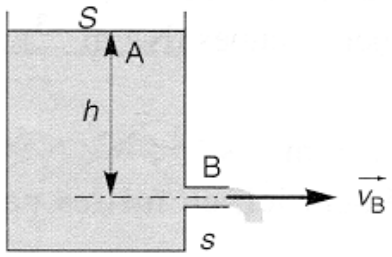
- **là où les canalisations se rétrécissent, la pression décroît.**

Cela est un peu surprenant car on penserait que, l'espace se resserrant la pression augmenterait : c'est le contraire qui se produit ! Une application courante est la trompe à eau (fig. 23). Comme $S_A > S_B$, alors $p_A > p_B$: il se crée en B une assez forte dépression, l'air de l'enceinte à vider, entraîné par l'eau (les bulles d'air sont nettement visibles lorsque la trompe est en verre) déserte celle-ci et la pression peut descendre jusqu'à une valeur de 0,025 bar.

- C'est cet effet qui permet aux voitures basses (formules 1 par exemple) de « coller » à la route mieux que d'autres.

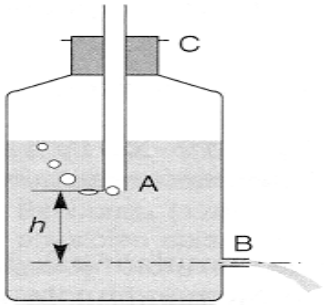
B. théorème de Torricelli :

- Considérons un vase large muni d'un petit orifice à sa base, de section *s,* Le liquide contenu dans le vase s'écoule par S. Si S est beaucoup plus grand que *s,* la vitesse en A est beaucoup plus petite qu'en B. Dans la formule de Bernoulli, on peut négliger v_A^2 devant v_B^2. nous posons $h = z_A - z_B$,



➢ **Question** : que vaut la vitesse en B si l'on considère que $v_A \approx 0$ m/s ?

- Une application simple mais finalement intéressante est le vase **de Mariotte** qui permet d'assurer un débit constant de liquide (fig. 26). L'appareil comporte un tube plongeur. La hauteur *h* qui intervient est celle entre B et A car c'est en A que règne la pression atmosphérique (il est important qu'une bonne étanchéité soit assurée en C). En réglant la plongée du tube, on fait varier *h,* donc *v* (théorème de Torricelli) et le débit. Le réglage effectué, le débit reste constant.

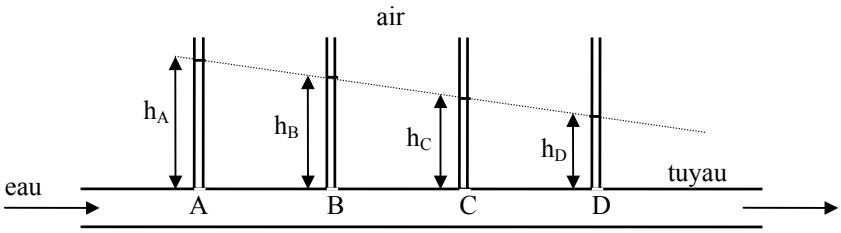


Vase de Mariotte.

4- écoulement d'un liquide visqueux : loi de poiseuille

4-1- expérience

Lorsque le fluide est visqueux , le théorème de Bernouilli n'est plus verifié. L'expérience suivante le montre :

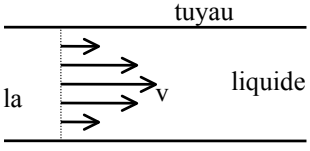


Il y a ce que l'on appelle **une perte de charge** : la pression le long du tuyau horizontal diminue progressivement alors qu'elle devrait rester constante. Ceci est du à la viscosité c'est à dire à la **perte progressive d'énergie de la part du fluide**. Dans des oléoducs par exemple , pour que cette perte entraînerait très rapidement l'arrêt du pétrole (très visqueux par rapport à l'eau) si on ne disposait pas de pompes le long du parcours permettant de redonner de l'énergie à cet écoulement.

4-2- loi de poiseuille

- L'**écoulement laminaire** se produit pour une vitesse d'écoulement faible.

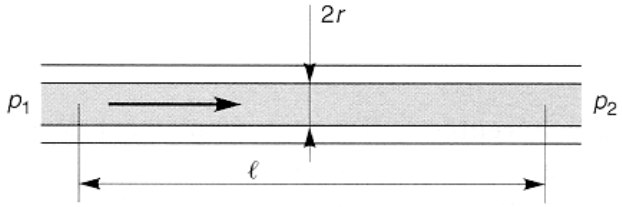
L'écoulement se fait en couches cylindriques qui glissent les unes sur les autres suivant des *lignes de courant* sensiblement parallèles : la vitesse du filet central est supérieure à la vitesse des filets latéraux.



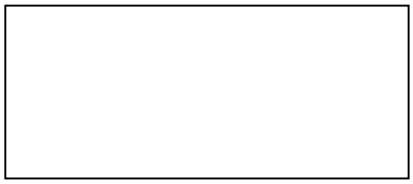
Le théorème de Bernoulli est inapplicable pour les tubes étroits pour une raison assez simple. Nous savons que la couche liquide située contre la paroi adhère à celle-ci : elle a une vitesse nulle par rapport à la paroi. Par contre, dans l'axe du tube la vitesse prend une valeur plus ou moins élevée, mais non nulle. La vitesse n'est donc pas constante dans une section donnée du tuyau, Contrairement à ce que nous avions supposé implicitement.

Remarque : si le tube est relativement large ,la vitesse est constante sur une bonne part de la section : le théorème de Bernouilli s'appliquera assez bien.

Par contre dans un tuyau étroit la vitesse est partout différente (dans un plan de coupe). Le théorème ne s ' applique pas. On a cependant trouvé une formule qui permet de calculer le débit en fonction de la différence de pression, formule qui fait intervenir certains paramètres absents de la loi de Bernoulli comme la viscosité (Cette loi de Poiseuille suppose l'écoulement laminaire.):



Tube capillaire.

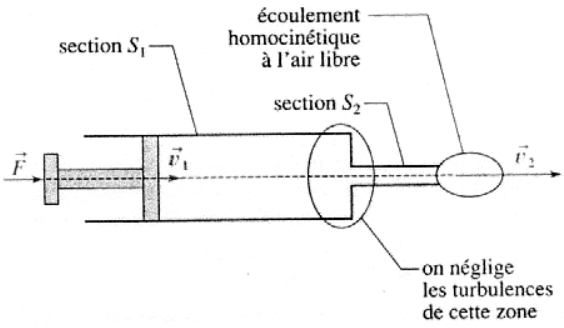


remarque : On notera l'importance du rayon, qui intervient à la puissance 4 !
Toutefois il faut savoir que cette formule s'applique aux seuls tubes capillaires (0,01< r < 0,5) en mm.

- **Exercice 1 :**

a) Calculer le débit sanguin en unités SI dans l'ensemble des artères partant du Coeur de section droite égale à 4,5 cm2, la vitesse du sang étant égale à 185 mm.s-1.
b) Même question dans l'ensemble des veines de section droite 18 cm2, la vitesse du sang étant de 46 mm.s-1
c) Déduire des deux premières questions le débit cardiaque en litres par minute.

- **Exercice 2 :** on dispose d'une seringue sur laquelle 1 infirmier exerce une force F. Cette seringue débouche dans une veine où la pression vaut 1,2 bar. Le liquide injecté à une viscosité de $\eta = 0,1$ Pl.



$R_1 = 1,5$ cm ; R_2 (bout de seringue) = 2 mm
$V_1 = 0,5$ cm/s
R(aiguille) = 0,5 mm
L(aiguille) = 3 cm
On veut que le débit volumique à la sortie de l'aiguille soit de 0, 5 cm^3/s

a) calculer la vitesse à la sortie de l'aiguille
b) calculer le débit à l'entrée de l'aiguille
c) en déduire la vitesse v_2 à l'entrée de l'aiguille
d) Quelle force F doit exercer l'infirmier ?

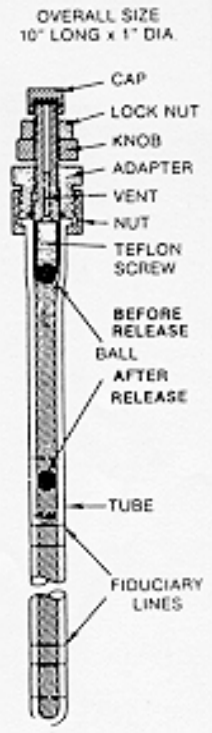
V- mesure de la viscosité

1- viscosimètre à bille : fiche TP N°1

1-1- principe

Le viscosimètre à chute de billes est reconnu comme l'un des instruments les plus efficaces et précis pour la détermination de viscosité .

ATTENTION , il est impératif que les surfaces soient le plus propres possibles pour une grande précision de mesure.



Ce nouvel instrument utilise une méthode originale pour libérer la bille et a les spécifications suivantes :

- Le tube est fait de verre en haute précision
- Deux billes de haute précision, une de verre et une en inox, sont livrées avec chaque instrument pour augmenter sa gamme de mesure.
- Le dispositif de libération de la bille est fait de Téflon et le joint torique est en Viton.
- Les parties plastique restantes sont faites de Delrin résistant à la corrosion.
- La bille est observée contre un fond blanc avec des lignes rouge permanentes incluses dans le verre.
- Disponible en 3 tailles pour couvrir une large gamme de viscosité :

voir tableau ci dessous :

Le nombre de cPo
tantale

Type de viscosimètre	Gamme de mesure (cPo)	Coefficient K	Réf
N°1 : rouge	0,2 – 10	0,3	88685
N°2 : noir	2 - 100	3,3	88686
N°3	20 - 1000	35	88687

- **ASSEMBLAGE .**

Le viscosimètre est fourni avec une bille en verre et une bille en inox (type 346). Une bille de Tantale peut être commandée séparément. Les gammes de viscosité recommandées pour chacune des tailles de bille sont les suivantes :

N^0	Verre	Inox	Tantale
1	0,2 à 2	l à 10	2 à 20
2	2 à 20	10 à 100	20 à 200
3	20 à 200	100 à 1000	200 à 2000

La bonne bille est sélectionnée et l'instrument **soigneusement nettoyé et séché**. La bille est ajoutée dans le tube et les différentes parties sont assemblées selon le diagramme fourni avec l'appareil.

La position du bouton de réglage (knob) et de l'écrou de verrouillage (lock nut) est ajustée de telles manière que le tube de Téflon préviendra juste la chute de la bille quand le bouton de réglage (knob) est tourné de manière à rencontrer l'adaptateur (adapter) .

Le dévissage du bouton de réglage relâchera la bille. Cet ajustement doit être fait soigneusement afin de ne pas surcomprimer le tube Téflon qui maintient la bille.

- **REMPLISSAGE AVEC DU LIQUIDE :**

L'écrou (nut) et l'adaptateur (adapter) sont séparés et le bouchon (cap) est retiré. La bille est également retirée du tube. Il est nécessaire de remplir. le tube avec environ 5 mL de liquide. Ce liquide doit être exempt de particule et filtré si nécessaire .

Les particules présentes dans le liquide interféreront avec le mouvement de la bille et réduiront la précision de la mesure. Le liquide est soigneusement pipeté à l'intérieur du tube jusqu'à presque le remplir totalement .

La bille est maintenant soigneusement ajoutée et on la laisse glisser jusqu'au fond du tube.

L'adaptateur et l'ensemble vissé en position de libération de bille est maintenant soigneusement inséré dans le tube et le liquide va pénétrer dans la capillaire de trop plein. L'écrou et l'adaptateur sont serrés sur les filetages du tube. Le bouchon est replacé sur son pas de vis.

- **EFFECTUER UNE MESURE:**

L'instrument plein de liquide est inversé jusqu'à ce que la bille entre dans le tube Téflon. Le bouton de réglage est tourné jusqu'à obtenir la position de blocage de la bille. L'instrument est remis dans sa position verticale normale et est prêt à effectuer une mesure.

Pour un travail plus précis, le viscosimètre devrait être immergé dans un bain à température constante avec des vitres transparentes pour observer les lignes fiduciaires.

A température élevée, le bouchon doit être retiré afin de permettre à l'excès de liquide de passer par le trop plein. L'air et les bulles de gaz doivent également être éliminés après que 1'équilibre soit atteint. Alors le bouchon est réinstallé. La bille est libérée en tournant le bouton de réglage vers l'écrou. Le temps de descente entre les deux lignes fiduciaires est mesuré avec un chronomètre. Des mesures répétées peuvent être faites en retirant le viscosimètre du bain, en l'inversant pour faire revenir la balle dans le dispositif de blocage. Avec une bonne technique, les mesures peuvent être reproductibles à 0,2 -l % (dépend du temps de descente).

- **CALCUL DE LA VISCOSITE:**

Pour un viscosimètre à chute de bille, la viscosité est calculée par la simple formule (voir mode d'emploi anglais).

La constante du viscosimètre K peut être obtenue en mesurant le temps de descente pour un liquide standard. (exemple : de l'eau pour la bille n^0 1, une solution étalon pour les billes n^0 2 et 3).

Pour un travail le plus précis possible$_1$ le liquide standard devrait avoir les propriétés physiques aussi proches que possible que le liquide de viscosité inconnu.

1-2- mesure

VISCOSIMETRE A BILLE

viscosimètre	bille	liquide d'étalonnage	liquide d'étude	température des mesures
❒ type **1** (0,2-10) ❒ type **2** (2-100) **n°**	❒ acier (ρ=8,02g/mL) ❒ verre (ρ=2,53 g/mL)			

viscosimètres rouge (n° 1) noir (n° 2)

QUESTIONS :

1- faire le bilan des forces s'exerçant sur la bille . Celle due à la viscosité s'exprime comme suit :
   - $F = k\ r\ \eta\ v$ v = vitesse
     r = rayon
     $k = 6\ \pi$
     η = viscosité
2- Le viscosimètre est conçu de telle sorte que entre les 2 repères, la vitesse de la bille soit constante . que vaut alors l'accélération de la bille entre les 2 traits ? Comment s'écrit alors le PFD ?
3- Trouver alors la relation ente η et Δt temps mis par la bille pour aller d'un repère à l'autre
4- Compléter le tableau ci dessous en effectuant les mesures demandé :
   a- choisir la bille utilisée en fonction de l'ordre de grandeur attendu pour la viscosité du liquide mesuré (voir Handbook)
   b- attention à bien tenir le tube vertical lors d'une mesure
   c- bien rincer à l'acétone (une dizaine de fois) entre les 2 séries de mesures avec l'étalon puis avec le liquide d'étude .

	t_1 (mn)	t_2 (mn)	t_3 (mn)	t_4 (mn)	t_5 (mn)	durée moyenne	η (cp)	K
liquide d'étalonnage								
liquide d'étude								

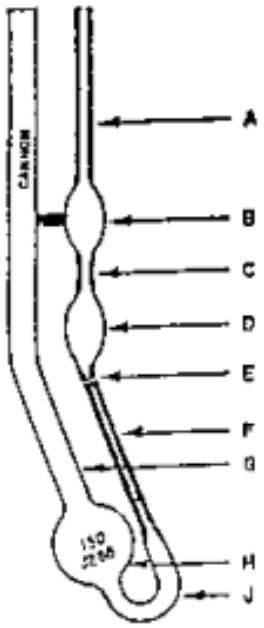
5- Trouve-t-on les valeurs tabulées ? Proposer une explication.

2- viscosimètre à capillaire : fiche TP N°2

2-1- principe

L'appareil. très simple comporte :

un capillaire bien calibré (il n'est pas nécessaire de connaître sa longueur ni son rayon).
une ampoule surmontant le capillaire, portant deux traits de repère.
un réservoir en U qui contient le liquide étudié.



l. Clean the viscometer using suitable solvents, and by passing clean, dry, filtered air through the instrument to remove the final traces of solvents. Periodically, traces of organic deposits should be removed with chromic acid.
2. If there is a possibility of lint, dust, or other solid material in the liquid sample, filter the sample through a sintered glass filter or fine mesh screen.
3. To charge the sample into the viscometer, invert the instrument and apply suction to tube C, immersing tube A in the liquid sample, and draw liquid to mark E. Wipe clean arm A, and turn the instrument to its normal vertical position.
4. Place the viscometer into the holder, and insert it into the constant temperature bath. A viscometer holder which fits the Cannon-Fenske Opaque viscometer and the Cannon-Manning Semi micro viscometer will also fit the Cannon-Fenske Routine viscometer. Align the viscometer vertically in the bath by means of a small plumb bob in tube C, if a self aligning holder is not used.
5. Allow approximately 10 minutes for the sample to come to the bath temperature at 40 ° C and 15 minutes at 100 ° C.
6. Apply suction to tube A (or pressure to tube F) and draw the liquid slightly above mark C.
7. To measure the efflux time, allow the liquid sample to flow freely down past C, measuring the time for the meniscus to pass from mark C to mark E.
8. A check run may be made by repeating steps 6 and 7.
9. Calculate the kinematic viscosity in centistokes of the sample by multiplying the efflux lime in seconds by the viscometer constant.

size	Approximate Constant Centistokes / second	Kinematic Viscosity Range Centistokes
25	0.002	0.5 to 2
50	0.001	0.8 to 1
75	0.008	l..6 to 5
100	0.015	3 to 15
150	0.035	7 to 35
200	0.1	20 to 100
300	0.25	50 to 250

L'ensemble est thermostaté.

- A l'aide d'une poire d'aspiration. faire monter le liquide jusqu'au dessus du repère.
- Enlever la poire.
- Déclencher le compte-seconde lorsque le niveau passe en A.
- Arrêter le compte-seconde lorsque le niveau passe en B.
- Le temps t doit être supérieur à 180 secondes, sinon l'écoulement ne serait pas vraiment laminaire.
- **Attention :** le tube de mise à la pression atmosphérique du réservoir ne doit pas plonger dans l'eau.

Pendant les mesures, apprécier l'incertitude sur la mesure du temps d'écoulement t de façon a' déterminer la précision avec laquelle les valeurs de la viscosité sont connues.

2-2- mesure

VISCOSIMETRE A CAPILLAIRE

fluide utilisé	ρ masse volumique	taille du viscosimètre	n ° du viscosimètre	contante K viscosimètre à 40 °C (cSt/s)	constante K viscosimètre à 100 °C (cSt/s)

1- Effectuez les mesures de viscosité environ tous les 3 °C. Vous enclencherez le chauffage à la fin de la 1 ère mesure.

θ_1 (°C) début mesure												
θ_2 (°C) fin de mesure												
$\theta = (\theta_1+\theta_2)/2$												
t (s)												
K (cSt/s)												
ν (cSt)												
η (cPo)												

2- Tracez la courbe $\eta = f(\theta)$

θ (°C)												
$T = \theta+273$ (K)												
$1 / T$ (K^{-1})												
$\ln \eta$												

2- Tracez la courbe $\ln \eta = f(T^{-1})$. En déduire son équation (vous utiliserez la régression linéaire):

droite de régression	coeff corrélation	relation entre η et T

Joindre les deux courbes et conclure

3- exercice d'annale (93)

Dans la détermination du coefficient de viscosité dynamique η d'un liquide de masse volumique ρ par un viscosimètre à capillaire, on mesure le temps d'écoulement t d'un volume donné de liquide. On a la relation : $\eta = K.\rho.t$ (K est la constante caractéristique du tube capillaire).

Question 1 : à 293 K, on a relevé pour l'eau et un solvant organique les valeurs suivantes pour le temps d'écoulement t : eau : t = 342,5 s solvant organique t = 271,4 s .

Déterminer η pour le solvant.

Données **:** η pour l'eau = 0,00101 Pa.s

Masse volumique du solvant = 984 $kg.m^{-3}$; Masse volumique de l'eau = 1000 $kg.m^{-3}$

Question 2 : La viscosité de l'eau a été mesurée à différentes températures ; les résultats suivants ont été obtenus :

T(K)	273	293	310	373
η (Pa.s)	0,001787	0,00101	0,000719	0,000283

Montrer que l'on a , entre η et T , la relation empirique : $\ln \eta = A + 1/T$ Déterminer A et B

VI- technique utilisant les phénomènes de transport dans les liquides

1- diffusion

Si l'on prend un verre d'eau sans aucun mouvement (dit de convection) dans le fluide et que l'on dépose délicatement à la surface une goutte de permanganate de potassium, celle ci se répend progressivement dans l'ensemble du verre d'eau : c'est ce qu'on appelle le phénomène de diffusion. Ce phénomène est irréversible.

Des utilisations en biologie sont très fréquentes notamment en utilisant des membranes qui sont perméables à certains composés et pas à d'autres ce qui permet de les séparer. C'est aussi par cette technique que l'on sépare l'uranium 235 de l'uranium 238 pour obtenir de l'uranium enrichi pour les centrales nucléaires.

2- Sédimentation

2-1- principe

Appelée en abrégé VS, il s'agit de la vitesse avec laquelle les globules rouges d'un échantillon de sang, contenu dans un tube étroit, se sédimentent, c'est-à-dire s'agglomèrent au fond du tube. Cet examen est facile à réaliser, mais donne des informations assez imprécises. On l'utilise cependant beaucoup dans le suivi de certaines maladies inflammatoires, les rhumatismes par exemple. La vitesse de sédimentation est élevée dans la plupart des maladies infectieuses et inflammatoires, en raison de l'augmentation dans le sang des protéines de la réaction inflammatoire comme le fibrinogène ou les alpha 2-globulines.

Résultat normal :
chez l'homme à la première heure : inférieure à 20 mm ;
chez la femme en période menstruelle à la première heure : inférieure à 40 mm ;
chez l'enfant et chez les personnes de plus de soixante-dix ans à la première heure : inférieure à 30 mm.

2-2- exercice d'annale (97)

On étudie la sédimentation d'un globule rouge dans le sang, sous l'effet de la pesanteur.

Question 1 : Faire le bilan et le schéma de toutes les forces qui s'exercent sur le globule rouge (faire un schéma)

Question 2 *:* Le mouvement du globule devient rapidement rectiligne uniforme. Calculer alors sa vitesse ***v*** de sédimentation dans le sang.

Question 3 : Quelle est la durée **t** nécessaire pour que le globule rouge se déplace de 10 cm quand son mouvement est rectiligne uniforme?

Question 4 : Quelle technique peut-on utiliser afin de réduire notablement cette durée? (voir VI-3)

Données :

masse volumique du globule rouge : $\rho = 1{,}30.10^3$ kg.m^{-3}.
rayon du globule rouge considéré comme sphérique : r = 2 μm
masse volumique du sang : $\rho' = 1{,}06.10^3$ kg.m^{-3}.
coefficient de viscosité du sang à la température de l'expérience : $= 10^{-3}$ S.I. (Pa.s)
valeur du champ de pesanteur g = 9,81 m.s^{-2}.
volume d'une sphère : $V = 4/3\ \pi.r^3$.

Rappel : La force de frottement s'exerçant sur une sphère de rayon r en mouvement à la vitesse **v** dans un fluide de coefficient de viscosité η vaut $f = 6\ \pi.\eta.r.v$.

3- Centrifugation

3-1- introduction

Une suspension de macromolécules peut éventuellement laisser sédimenter celles-ci sous l'effet du champ de pesanteur. Cependant, l'agitation thermique met en œuvre des énergies bien supérieures à l'énergie potentielle de gravitation, pour une macromolécule se déplaçant sur quelques centimètres.
Pour rendre possible la séparation, il faut travailler avec de très grandes accélérations. Ceci est possible avec des centrifugeuses ou ultracentrifugeuses.

3-2- théorie simple de la centrifugation

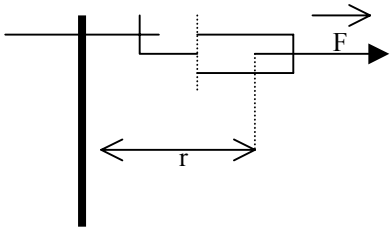
En effet une particule animée d'un mouvement rotatif autour d'un axe, subit une force qui l'éloigne de l'axe appelée force centrifuge . On peut comparer l'effet de la force centrifuge au poids qui intervient pour la sédimentation pour peu que le tube à essai soit dirigé selon l'axe de cette force . **En fin de compte, la centrifugation a le même effet qu'une sédimentation mais avec une accélération multipliée par un facteur A par rapport à l'accélération de la pesanteur (g = 9,8 m/s^2)**

La valeur du coefficient multiplicatif A peut atteindre plusieurs milliers ! La centrifugation accélère donc notablement la sédimentation (ou décantation).

A est une caractéristique du matériel puisque A ne dépend que du type et du rayon de la centrifugeuse et de sa vitesse.

On exprime souvent la vitesse en N tours/mn à la place de w (en rad/s).

En fait la rotation des tubes autour d'un axe crée une force sur les particules en suspension perpendiculaire et l'axe de rotation et de valeur $\mathbf{F = m.\omega^2.r}$ où ω est la vitesse angulaire de rotation en rad/s (RQ : $\omega = 2\pi.N$ avec N en tour/min)
r est la distance à l'axe de rotation.



Cas du rotor à godets oscillants

L'accélération subie par les particules vaut alors $\omega^2 r$

Ex : N = 1 000 tours /min donc ω = 62 80 rad/s
r = 0,2 m
alors $a = \omega^2 r = 8.\ 10^6\ m.s^{-2} \approx 10^6\ g_{terrestre}$! ! !

3-3- constitution des centrifugeuses

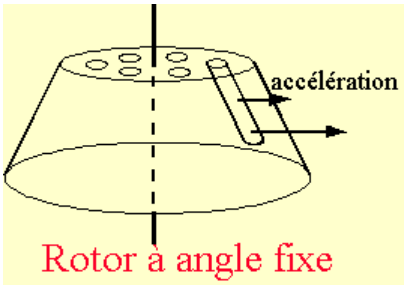
Ces appareils, sont composés des éléments suivants:

- un moteur capable de tourner à plusieurs dizaine de milliers de tours par minute
- un rotor, capable de supporter des rotations aussi rapides (en titane généralement pour les rotors des ultra-centrifugeuses)
- une enceinte dans laquelle est disposé le rotor, qui est réfrigérée et sous vide. En effet, pour les vitesses de rotation les plus rapides, le déplacement des extrémités du rotor (diamètre de l'ordre de 20-40 cm) est supersonique. Ceci entraînerait un échauffement insupportable dans l'air.
- cette enceinte est de plus blindée pour éviter des accidents en cas d'explosion du rotor.

Remarque : les types de rotors existants

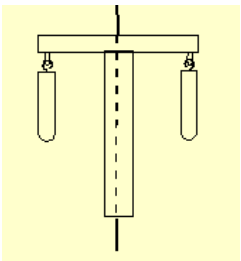
Les rotors sont principalement de 2 *types:*

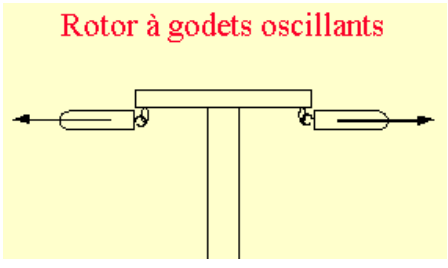
- *à angle fixe*



Pour ce type de godet , seule la composante de l'accélération dirigée selon l'axe du tube participe à la décantation !

- *à godets oscillants*





Les rotors à godets oscillants sont utilisés pour des séparations plus fines, parce que la force de centrifugation s'exerce dans le sens de la longueur du godet. En effet celui-ci est mobile autour de son point de suspension à la potence.